

Die beiden Raman-Laser induzieren aber die Bewegung der Atome entlang dieser Richtung, indem sie ihnen Energie zur Verfügung stellen bzw. Energie aufnehmen, um diese Energielücken zu überwinden. Eine genaue quantenmechanische Analyse des optischen Quantentunnels zeigt, dass sich dabei die Phase der Raman-Laser auf die Wellenfunktion der Atome überträgt. Eine entsprechende Laserkonfiguration ermöglicht es, ein beliebig hohes Magnetfeld zu simulieren [3]. Im Experiment gelang es den Münchner Physikern, diese Magnetfeldsimulation mit einer erst kürzlich entwickelten Technologie zur optischen Auflösung einzelner Gitterplätze zu kombinieren. Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten, um mikroskopische Quantenbewegung in Magnetfeldern zu manipulieren und zu beobachten.

In den ersten Experimenten haben Aidelsburger und ihre Kollegen alternierende Magnetfelder untersucht. Dabei wechselt der magnetische Fluss von einer Spalte des optischen Gitters zur nächsten sein Vorzeichen (Abb. 1). Das Experiment demonstriert, dass solche Magnetfelder zur Frustration der Atome führen können. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Gitter mit nur einem einzigen wohldefinierten Grundzustand kann das Magnetfeld zwei entartete Grundzustände kreieren, die für die Atome gleichermaßen (un)attraktiv

sind. Im Experiment teilen sich die Atome gleichmäßig auf diese beiden Zustände auf, was sich durch die Messung des Quasiimpulses der Atomwolke deutlich zeigt.

Frustrierte Zustände spielen in der Erforschung von Magnetismus in Festkörpern eine wichtige Rolle, da den entarteten Grundzuständen verschiedene magnetische Konfigurationen entsprechen, die in Konkurrenz zueinander stehen. Dies führt zu Überlagerungen und damit zu neuen magnetischen Anordnungen. Solche Prozesse theoretisch zu beschreiben, stellt nach wie vor eine Herausforderung dar, insbesondere wenn viele entartete Grundzustände beteiligt sind. Experimente mit frustrierten Zuständen können wertvolle Hinweise auf ihre Eigenschaften liefern und zu einem besseren Verständnis magnetischer Phasen führen.

Im zweiten Teil der Arbeit geht es darum, ein Quantenkarussell für kalte Atome zu studieren. Dieses besteht aus vier Gitterplätzen, angeordnet an den Eckpunkten eines Quadrates, das wie in Abb. 1 einen magnetischen Fluss  $\Phi$  einschließt. Die Atome starten in einer quantenmechanischen Überlagerung in zwei der Gitterplätze gleichzeitig. Der Fluss  $\Phi$  versetzt sie in eine (fast) periodische Zyklotronbewegung. Diese konnten die Münchner Physiker im Experiment zeitaufgelöst erfassen und dadurch einen detaillierten Einblick in die mikro-

oskopische Quantendynamik von Atomen im Magnetfeld gewinnen.

Experimente mit dem Ziel, Quanteneffekte im Magnetfeld mittels kalter Atome zu studieren, verfolgen weltweit mehrere Gruppen. So haben Wissenschaftler in Hamburg kürzlich magnetische Frustration in Dreiecksgittern nachgewiesen [4]. Eine Gruppe am NIST hat im Januar 2012 vom ersten Nachweis des Hall-Effektes in superflüssigen kalten Atomen berichtet [5]. Die Herstellung künstlicher Magnetfelder für neutrale Atome eröffnet eine ganze Reihe von neuen Möglichkeiten, um Einblicke in die Welt der Quantenmechanik zu erlangen. Allerdings sind auch die nächsten Herausforderungen groß: Um nämlich Zugang zu magnetischen Effekten in stark korrelierten wechselwirkenden Quantensystemen zu erhalten, sind noch niedrigere Temperaturen und eine noch exquisitere Kontrolle über die Teilchenzahlen im optischen Gitter erforderlich. Diese ersten Experimente sind jedoch bereits außerordentlich wichtige Schritte auf diesem Weg zum besseren Verständnis von Magnetismus.

Dieter Jaksch

- [1] R. A. Williams et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 050404 (2010)
- [2] M. Aidelsburger et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 255301 (2011)
- [3] D. Jaksch et al., New J. Phys. **5**, 56 (2003)
- [4] J. Struck et al., Science **333**, 996 (2011)
- [5] L. J. LeBlanc et al., arXiv:1201.5857v1

## ■ Mit dem Kopf durch die Wand

Quantenmechanisches Klein-Tunneln lässt sich in ultrakalten Gasen realisieren.

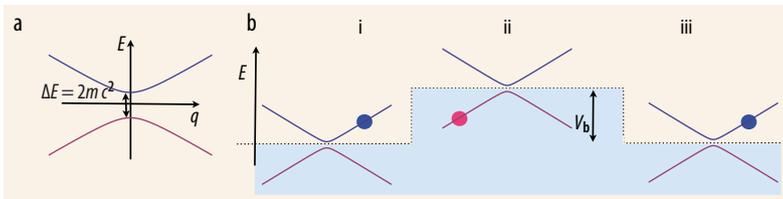
Die Quantenmechanik zwingt uns in vielerlei Hinsicht dazu, unsere klassisch geprägte physikalische Intuition aufzugeben. So besagt die nichtrelativistische Quantenmechanik, dass ein Teilchen mit exponentiell kleiner, aber endlicher Wahrscheinlichkeit in einen klassisch verbotenen Bereich eindringen und sogar hindurch tunneln kann. Die relativistische Quantenmechanik geht sogar noch einen Schritt weiter: 1929 machte

Oskar Klein die Vorhersage, dass eine Barriere unter bestimmten Umständen sogar perfekt durchlässig werden kann [1].

Der Schlüssel zum Verständnis dieses Phänomens, kurz Klein-Tunneln genannt, liegt in der Struktur der Energie-Impuls-Beziehung für Lösungen der relativistischen Dirac-Gleichung. Diese lässt Lösungen mit positiver und negativer Energie zu (Abb. 1a). Die Lösungen positiver Energie sind von denen mit negativer

Energie durch eine Energielücke getrennt, die für elementare Teilchen der doppelten Ruheenergie entspricht, d. h.  $\Delta E = 2 m c^2$  ( $m$  ist die Ruhemasse und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit). Ein Tunnelvorgang geht wie folgt vonstatten (Abb. 1b): Ausgangspunkt ist ein Teilchen mit einer kinetischen Energie  $E$  (blauer Punkt), das auf eine Potentialbarriere der Höhe  $V_b$  aufläuft (Abschnitt ii). Dort verschiebt sich die Energie-Impuls-Beziehung um

+) Die Wahrscheinlichkeit wird sogar eins, wenn  $\Delta E = 0$ .



**Abb. 1** (a) Die Energie-Impuls-Relation  $E(q)$  der Dirac-Gleichung weist eine Energielücke  $\Delta E$  zwischen Lösungen mit posi-

tiver und negativer Energie auf. (b) Wenn die Potentialbarriere groß ist gegen  $\Delta E$ , tritt Klein-Tunneln auf. (vgl. Text)

$V_b$  gegenüber den beiden anderen Abschnitten (i und iii). Wenn die Potentialbarriere viel größer ist als die Ruheenergie, existiert im klassisch verbotenen Bereich (ii) eine Lösung mit negativer Energie relativ zu  $V_b$  (roter Punkt), die die Energie des einlaufenden Teilchens besitzt. Hinter der Barriere befindet sich wieder ein erlaubter Energiezustand (blauer Punkt), und das Teilchen kann mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Energiebarriere tunneln.<sup>†)</sup> Exponentielles Tunneln findet dann statt, wenn die Potentialbarriere kleiner ist als  $\Delta E$ , da das Teilchen dann keinen Zustand gleicher Energie in der Barriere vorfindet.

Die Beobachtung von Klein-Tunneln hängt also davon ab, ob sich Potentialbarrieren erzeugen lassen, die sehr groß gegen die Ruheenergie sind. Für elementare Teilchen, wie z. B. Elektronen im Vakuum, wurde Klein-Tunneln nie beobachtet, was an den extrem hohen elektrischen Feldern ( $10^{16}$  V/cm) liegt, die hierfür nötig wären.

Bessere Chancen bieten sich in Festkörpern oder ultrakalten Gasen in optischen Gittern. Periodische

Strukturen führen dazu, dass sich Energiebänder ausbilden. Oft ist es möglich, deren Energie-Impuls-Beziehung durch effektive Dirac-Gleichungen mit einer effektiven Masse  $m_{\text{eff}}$  und einer effektiven Lichtgeschwindigkeit  $c_{\text{eff}}$  zu beschreiben, die sich aus der Steigung der Energie-Impuls-Relation und der Energielücke in Analogie ableiten lassen. Ideal für die Beobachtung von Klein-Tunneln sind Systeme mit  $m_{\text{eff}} = 0$ , da dann schon kleine Potentiale Klein-Tunneln zulassen würden. Dies ist der Fall in Graphen, einem einlagigen System aus Kohlenstoffatomen [2], wo Klein-Tunneln 2009 beobachtet wurde [3, 4].

Nun haben Martin Weitz und Mitarbeiter der Universität Bonn Klein-Tunneln in einem ultrakalten Gas beobachtet [5]. In ihrem Experiment gelingt es, ein eindimensionales System zu simulieren, dessen Energielücke  $\Delta E$  und damit effektive Ruhemasse  $m_{\text{eff}}$  sich gezielt manipulieren lassen. Hierzu erzeugen die Bonner Physiker aus den stehenden Wellen von Lasern ein periodisches Potential (optisches Gitter), das zu Energiebändern mit

## KURZGEFASST

### ■ Peppige Neutrinos

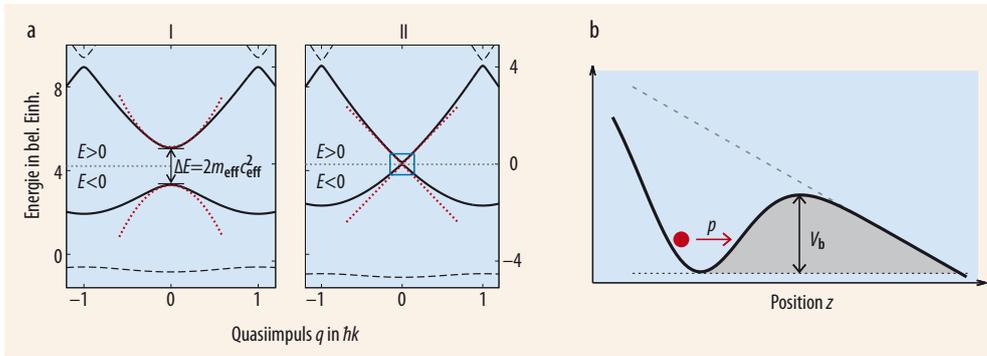
Die Sonne erzeugt Energie durch die mehrstufige Fusion von Wasserstoff zu Helium (Proton-Proton-Zyklus). An deren Beginn steht meist die Reaktion von zwei Protonen zu Deuterium unter Emission eines Positrons und eines Neutrinos. 400-mal seltener tritt die Proton-Elektron-Proton-Reaktion (kurz: pep) auf, bei der aus zwei Protonen und einem Elektron ein Deuterium und ein Neutrino mit einer Energie von 1,44 MeV entsteht. Der Borexino-Kollaboration ist es nun erstmals gelungen, diese pep-Neutrinos eindeutig nachzuweisen. Das Ergebnis stimmt mit dem Sonnenmodell überein.

G. Bellini et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 051302 (2012)

### ■ Atomare Laserpulse

Das Licht von Freie-Elektronen-Lasern (FEL) erlaubt es, elektronische Prozesse und chemische Reaktionen zu beobachten oder die Struktur von Proteinen zu entschlüsseln. Nun haben Physiker des Hamburger Center for Free-Electron Laser Science am kalifornischen SLAC den ersten atomaren Röntgenlaser realisiert. Dazu strahlten sie einen FEL-Puls in eine Zelle mit Neongas, wo dieser je ein inneres Elektron aus einem Neonatom herauszuschlug und damit die Besetzungsinversion des  $K_\alpha$ -Übergangs lieferte. Die Neonatome sendeten daraufhin Pulse einer Wellenlänge von 1,46 nm aus.

N. Rohringer et al., Nature **481**, 488 (2012)



**Abb. 2** Die Phasenverschiebung erlaubt es, die Energielücke  $\Delta E$  zwischen zweitem und drittem Band einzustellen (Bandstruktur I bzw. II). I führt für moderate Potentiale zu exponentiellem Tunneln, II zu Klein-Tunneln (a, schwarz). Das Tunnelpotential ist eine Funktion der vertikalen Koordinate  $z$ , wobei der graue schattierte Bereich klassisch verboten ist (b).

definiertes Energie-Impuls-Beziehung führt. Konkret überlagern sie dazu zwei Gitterharmonische mit einer relativen Phasenverschiebung, von deren Wert es abhängt, ob die Energielücke zwischen zweitem und drittem Bloch-Band (schwarz) groß ist (I in **Abb. 2a**) oder gegen Null geht (II). Das erste Bloch-Band (gestrichelt) spielt im Experiment keine Rolle.

Die effektive Lichtgeschwindigkeit  $c_{\text{eff}}$  der Bänder beträgt  $1,1 \text{ cm/s}$ , was zehn Größenordnungen kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Wenn die Energielücke  $\Delta E$  und damit die effektive Masse  $m_{\text{eff}}$  wie in II gegen Null gehen, hängt Klein-Tunneln nicht von der Höhe der Potentialstufe ab

(vgl. **Abb. 1b**). In Situation I ist für eine kleine Potentialbarriere konventionelles Tunneln zu erwarten.

Im Experiment werden zuerst ultrakalte Rubidiumatome präpariert, welche mithilfe einer Abfolge von freiem Fall im Schwerfeld und Laserpulsen in das dritte Bloch-Band gehoben werden. Anschließend befinden sich die Atome in einem Potential, das mithilfe eines zusätzlichen Lasers und des Gravitationspotentials erzeugt wird (**Abb. 2b**). Die Bonner Forscher untersuchen nun das Tunnelverhalten in den beiden Situationen I und II, indem sie die Verteilung der Atome in der Falle und speziell im Barrierenbereich (grau schattiert) nach einer festgelegten Zeit aufzeichnen. Wäh-

rend die Atome in I im Potentialminimum gefangen sind und die Barriere nicht durchdringen, wie es im nichtrelativistischen Grenzfalle zu erwarten ist, können sie in II auch den klassisch verbotenen Bereich bevölkern. Weiterhin finden die Experimentatoren, dass die Atomverteilung in II nicht von der Potentialhöhe abhängt. Zusammengefasst belegt dies sehr überzeugend, dass in II Klein-Tunneln stattfindet, in I nicht.

Das Experiment der Bonner Forschergruppe ist ein erfolgreicher Schritt hin zur kontrollierten Simulation der Dirac-Gleichung und eröffnet damit die Möglichkeit, weitere Vorhersagen dieses und verwandter Modelle zu untersuchen. Es ist ein eindrucksvolles Beispiel dafür, dass sich mit ultrakalten atomaren Gasen quantenmechanische Effekte gezielt simulieren lassen.

Lars Fritz

Dr. Lars Fritz, Institut für Theoretische Physik, Universität Köln

- [1] O. Klein, Zeitschrift für Physik **53**, 157 (1929)
- [2] P. Recher und B. Trauzettel, Physik Journal, Dezember 2010, S. 22
- [3] A. F. Young und P. Kim, Nature Physics **5**, 222 (2009)
- [4] N. Stander, B. Huard und D. Goldhaber-Gordon, Phys. Rev. Lett. **102**, 026807 (2009)
- [5] T. Salger, C. Grossert, S. Kling und M. Weitz, Phys. Rev. Lett. **107**, 240401 (2011)

### LEUCHTFEUER IM REGENWALD

Das Amazonasbecken beherbergt den größten tropischen Regenwald der Welt. Doch trotz seiner globalen Bedeutung ist im Amazonasgebiet nur wenig über Aerosole bekannt, die eine wichtige Komponente im Kreislauf von Wolken- und Niederschlagsbildung sind. Daher haben Wissenschaftler des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung sowie dreier brasilianischer Universitäten mithilfe eines LIDAR-Systems die Verteilung und Eigenschaften der Aerosole bis in eine Höhe von 20 km gemessen. Das LIDAR-System hat Laserimpulse der Wellenlängen 355, 532 und 1064 nm ausgesendet, die von den in der Atmosphäre schwebenden Partikeln reflektiert wurden. Durch die Drehung der Schwingungsrichtung des Laserlichts bei der Reflexion konnten die Wissenschaftler Art und Herkunft der Aerosole bestimmen. Überraschenderweise fanden sie bei einem Drittel der



Holger Baars / IFT

Das LIDAR-Messsystem sendet mitten im brasilianischen Regenwald grüne Laserpulse in die Atmosphäre, um Aerosole zu vermessen.

Messungen Rauch- und Mineralstaubpartikel von afrikanischen Vegetationsfeuern. Welchen Einfluss die afrikanischen Aerosole auf das Klima im Ama-

zonasgebiet haben, müssen nun weitere Untersuchungen klären. H. Baars et al., Geophys. Res. Lett. **38**, L20802 (2011)